



Validierung des Kontaktmoduls der Freeware Z88Aurora anhand analytischer Beispiele und kommerzieller FE-Systeme

SAXSIM 2017

28.03.2017 Chemnitz

Daniel Goller, Daniel Billenstein, Florian Nützel, Christian Glenk,
Frank Rieg



Freeware FE Software

Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- 2D/3D-Netzerzeugung
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke
- Große, editierbare Materialdatenbank

FE-Solver

- 25 verschiedene Finite-Element-Typen
- Parallelisierte Algorithmen
- Direkte und iterative Gleichungslöser
- Lineare, nichtlineare, thermo-mechanische und Eigenschwingungsanalyse

Postprocessing

- Freie Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungsausgabe nach GEH, NH, SH
- Einzeldarstellung sensibler Bauteilbereiche
- Einfacher Export von Analyseergebnissen



Freeware Topologieoptimierung



Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke

Optimierung/FE-Solver

- 2 verschiedene Finite-Element-Typen:
 - Lineare Tetraeder
 - Lineare Hexaeder
- 2 Optimierungsverfahren:
 - Optimalitätskriterien
 - TOSS: Topology Optimization for Stiffness and Stress

Postprocessing

- Designvariable und Nachgiebigkeit als Ergebnisgrößen
- Darstellung aller Iterationsschritte
- Freie Wahl der Darstellungsgrenze



Open Source – FE Software

- Mappedmeshing
- Import
- Lineare Festigkeitsanalyse
- Postprocessing im Z88o

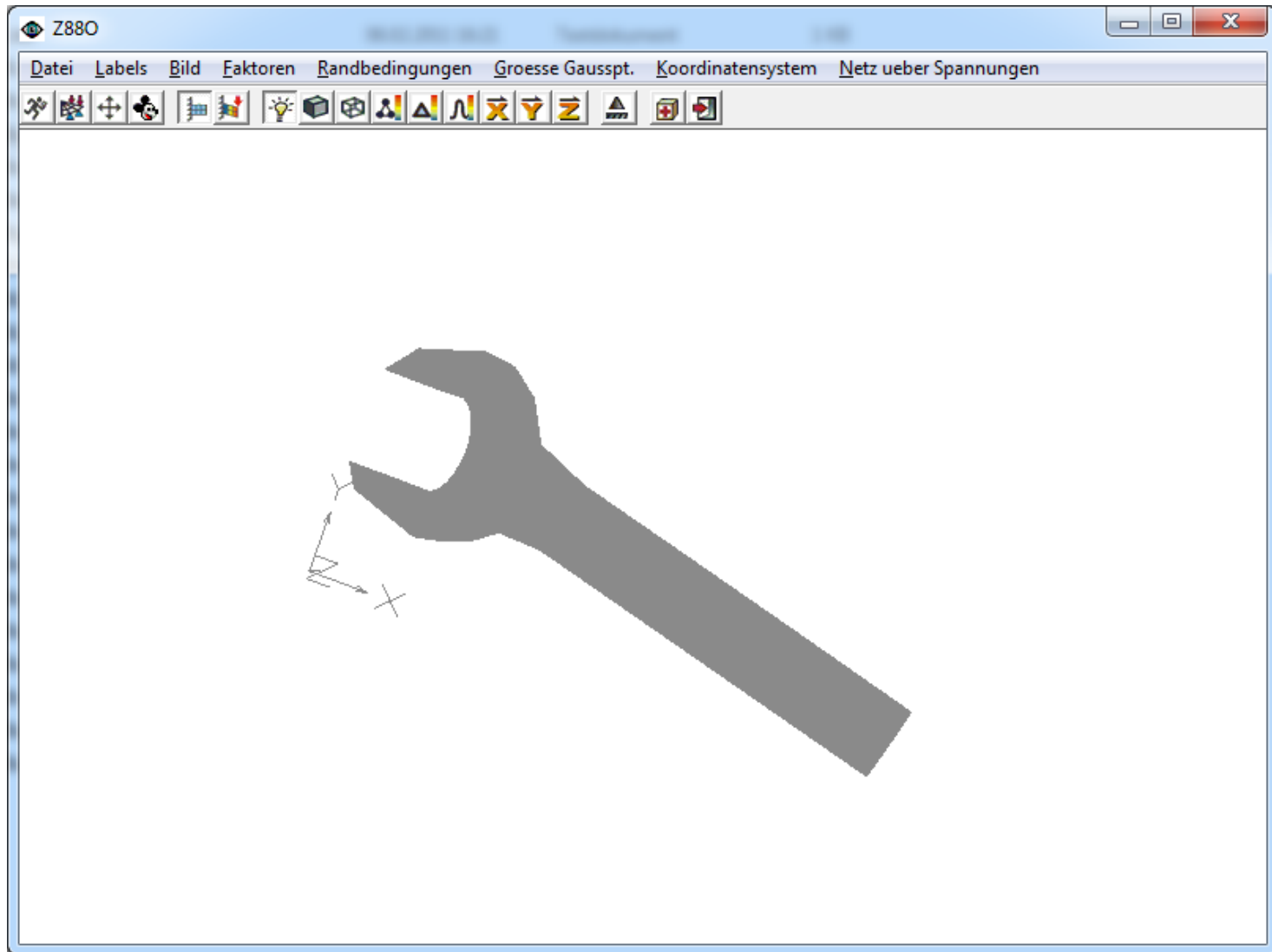
Android – FE Software



- 2D/3D-Netzerzeugung
- 2D-Strukturen zeichnen
- Direkter Gleichungslöser
- Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungen nach GEH

Die Z88-Familie

Z88OS



Quelle: [1,2]

3



Freeware FE Software

Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- 2D/3D-Netzerzeugung
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke
- Große, editierbare Materialdatenbank

FE-Solver

- 25 verschiedene Finite-Element-Typen
- Parallelisierte Algorithmen
- Direkte und iterative Gleichungslöser
- Lineare, nichtlineare, thermo-mechanische und Eigenschwingungsanalyse

Postprocessing

- Freie Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungsausgabe nach GEH, NH, SH
- Einzeldarstellung sensibler Bauteilbereiche
- Einfacher Export von Analyseergebnissen



Freeware Topologieoptimierung



Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke

Optimierung/FE-Solver

- 2 verschiedene Finite-Element-Typen:
 - Lineare Tetraeder
 - Lineare Hexaeder
- 2 Optimierungsverfahren:
 - Optimalitätskriterien
 - TOSS: Topology Optimization for Stiffness and Stress

Postprocessing

- Designvariable und Nachgiebigkeit als Ergebnisgrößen
- Darstellung aller Iterationsschritte
- Freie Wahl der Darstellungsgrenze



Open Source – FE Software

- Mappedmeshing
- Import
- Lineare Festigkeitsanalyse
- Postprocessing im Z88o

Android – FE Software



- 2D/3D-Netzerzeugung
- 2D-Strukturen zeichnen
- Direkter Gleichungslöser
- Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungen nach GEH



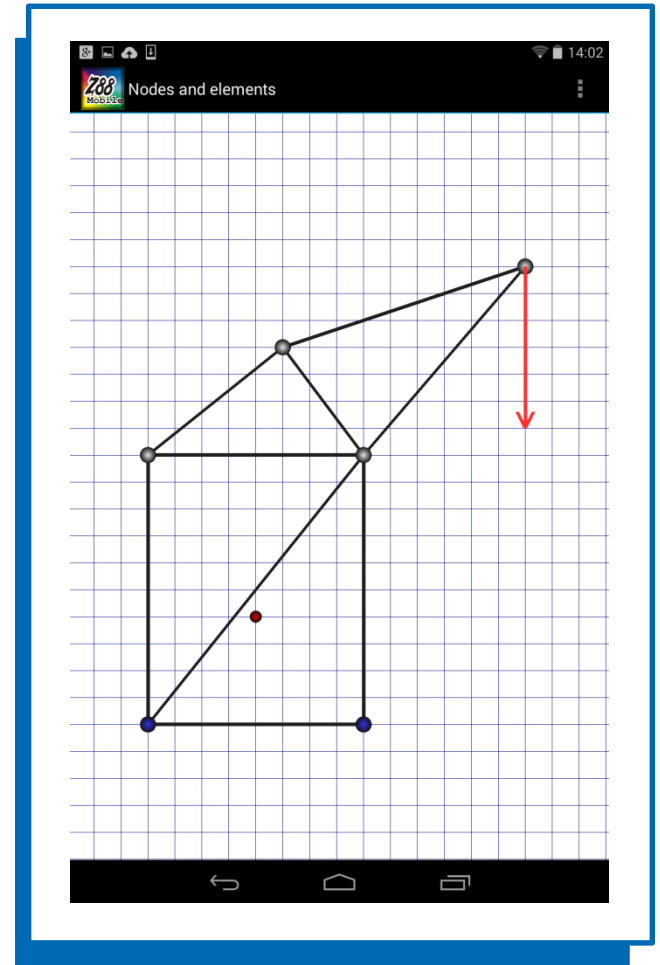
Funktionen

Direkter Solver (Cholesky)

8 Elementtypen

Lineare Elastostatik

Gestensteuerung





Freeware FE Software

Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- 2D/3D-Netzerzeugung
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke
- Große, editierbare Materialdatenbank

FE-Solver

- 25 verschiedene Finite-Element-Typen
- Parallelisierte Algorithmen
- Direkte und iterative Gleichungslöser
- Lineare, nichtlineare, thermo-mechanische und Eigenschwingungsanalyse

Postprocessing

- Freie Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungsausgabe nach GEH, NH, SH
- Einzeldarstellung sensibler Bauteilbereiche
- Einfacher Export von Analyseergebnissen



Freeware Topologieoptimierung



Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke

Optimierung/FE-Solver

- 2 verschiedene Finite-Element-Typen:
 - Lineare Tetraeder
 - Lineare Hexaeder
- 2 Optimierungsverfahren:
 - Optimalitätskriterien
 - TOSS: Topology Optimization for Stiffness and Stress

Postprocessing

- Designvariable und Nachgiebigkeit als Ergebnisgrößen
- Darstellung aller Iterationsschritte
- Freie Wahl der Darstellungsgrenze



Open Source – FE Software

- Mappedmeshing
- Import
- Lineare Festigkeitsanalyse
- Postprocessing im Z88o

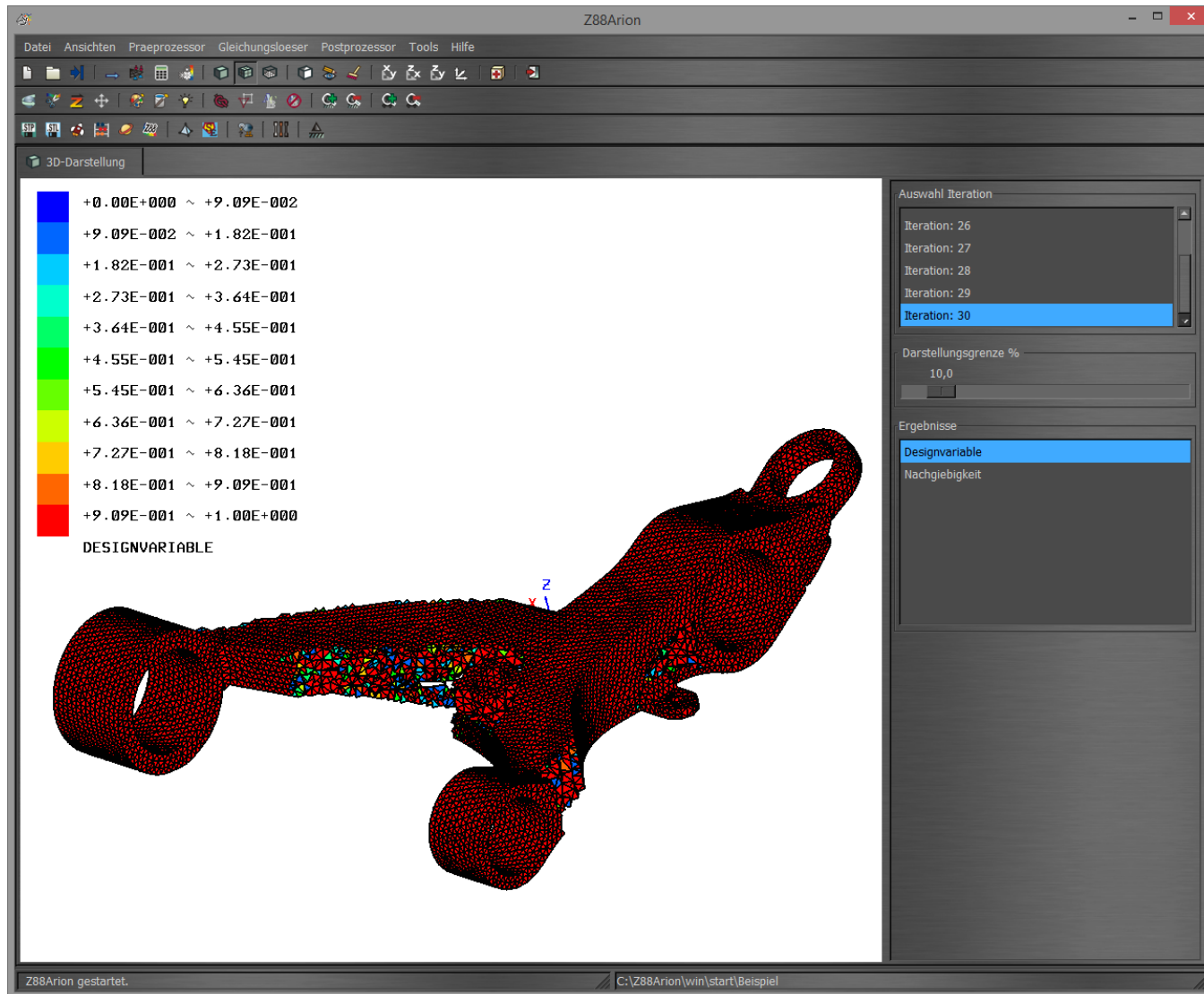
Android – FE Software



- 2D/3D-Netzerzeugung
- 2D-Strukturen zeichnen
- Direkter Gleichungslöser
- Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungen nach GEH

Die Z88-Familie

Z88Arion



Quelle: [1]

7



Freeware FE Software

Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- 2D/3D-Netzerzeugung
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke
- Große, editierbare Materialdatenbank

FE-Solver

- 25 verschiedene Finite-Element-Typen
- Parallelisierte Algorithmen
- Direkte und iterative Gleichungslöser
- Lineare, nichtlineare, thermo-mechanische und Eigenschwingungsanalyse

Postprocessing

- Freie Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungsausgabe nach GEH, NH, SH
- Einzeldarstellung sensibler Bauteilbereiche
- Einfacher Export von Analyseergebnissen



Freeware Topologieoptimierung



Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen
 - Fixierungen, Deformationen
 - Kräfte, Drücke

Optimierung/FE-Solver

- 2 verschiedene Finite-Element-Typen:
 - Lineare Tetraeder
 - Lineare Hexaeder
- 2 Optimierungsverfahren:
 - Optimalitätskriterien
 - TOSS: Topology Optimization for Stiffness and Stress

Postprocessing

- Designvariable und Nachgiebigkeit als Ergebnisgrößen
- Darstellung aller Iterationsschritte
- Freie Wahl der Darstellungsgrenze



Open Source – FE Software

- Mappedmeshing
- Import
- Lineare Festigkeitsanalyse
- Postprocessing im Z88o

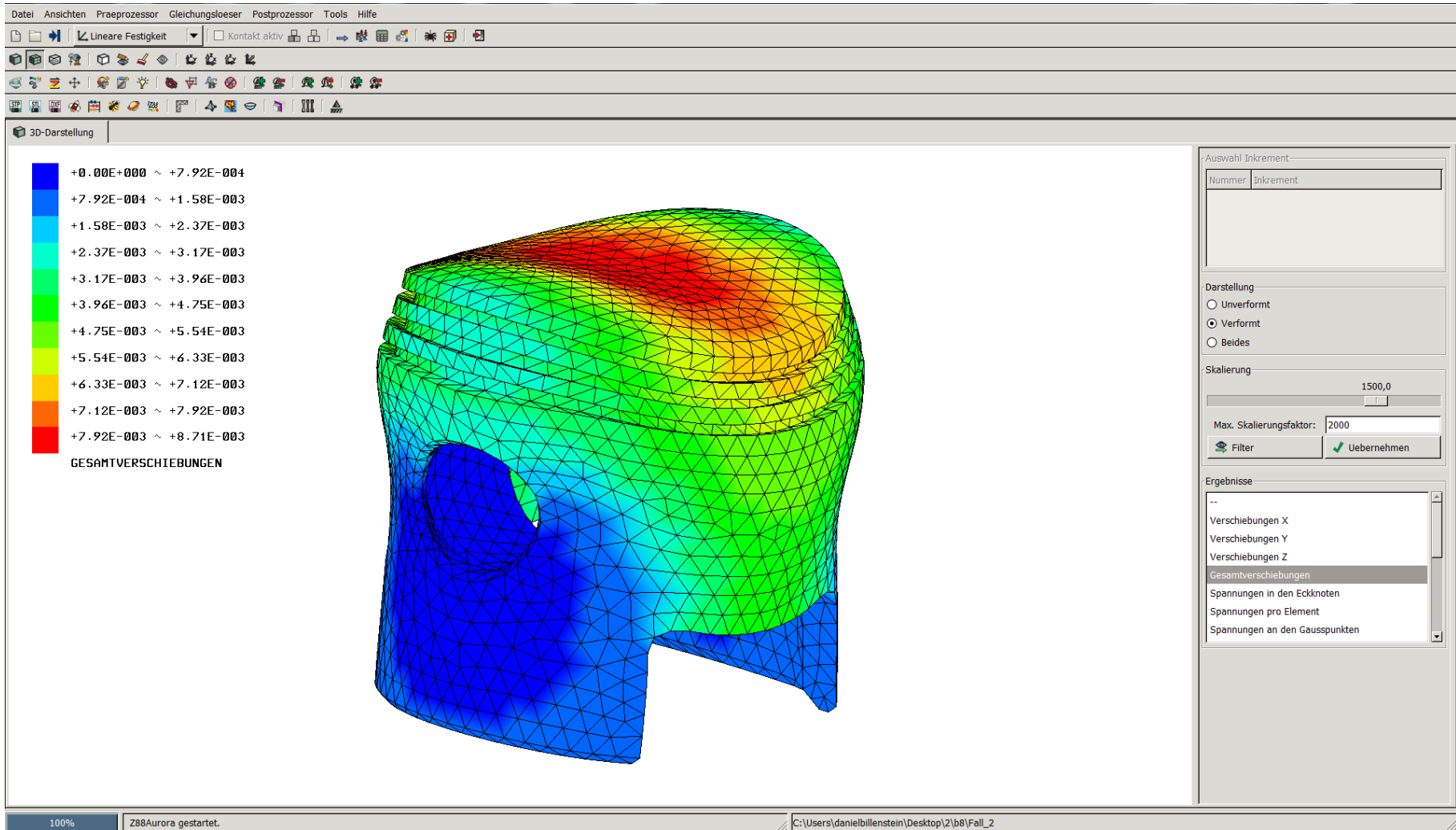
Android – FE Software



- 2D/3D-Netzerzeugung
- 2D-Strukturen zeichnen
- Direkter Gleichungslöser
- Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungen nach GEH

Die Z88-Familie

Z88Aurora



Die Z88-Familie

Funktionsumfang des Z88-Kontaktmoduls



Funktionen

Bauteilverwaltungstool

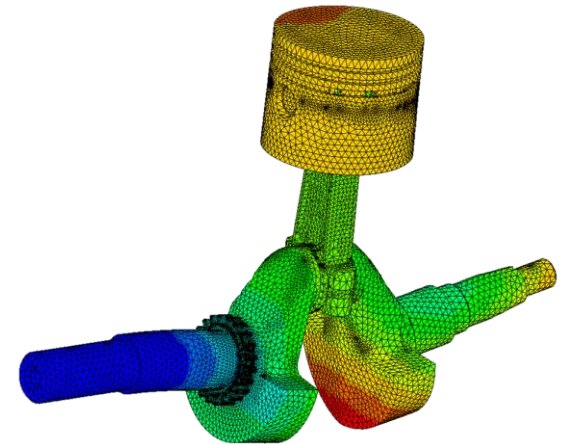
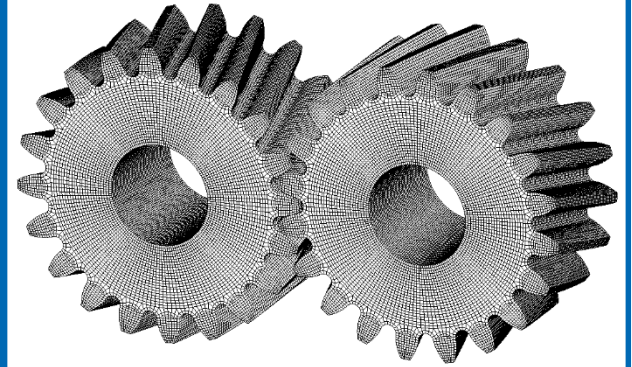
4 Elementtypen: Lin./Quad. Hex/Tet

Lineare Elastostatik

2 Kontaktarten: Verklebt, Reibungsfrei

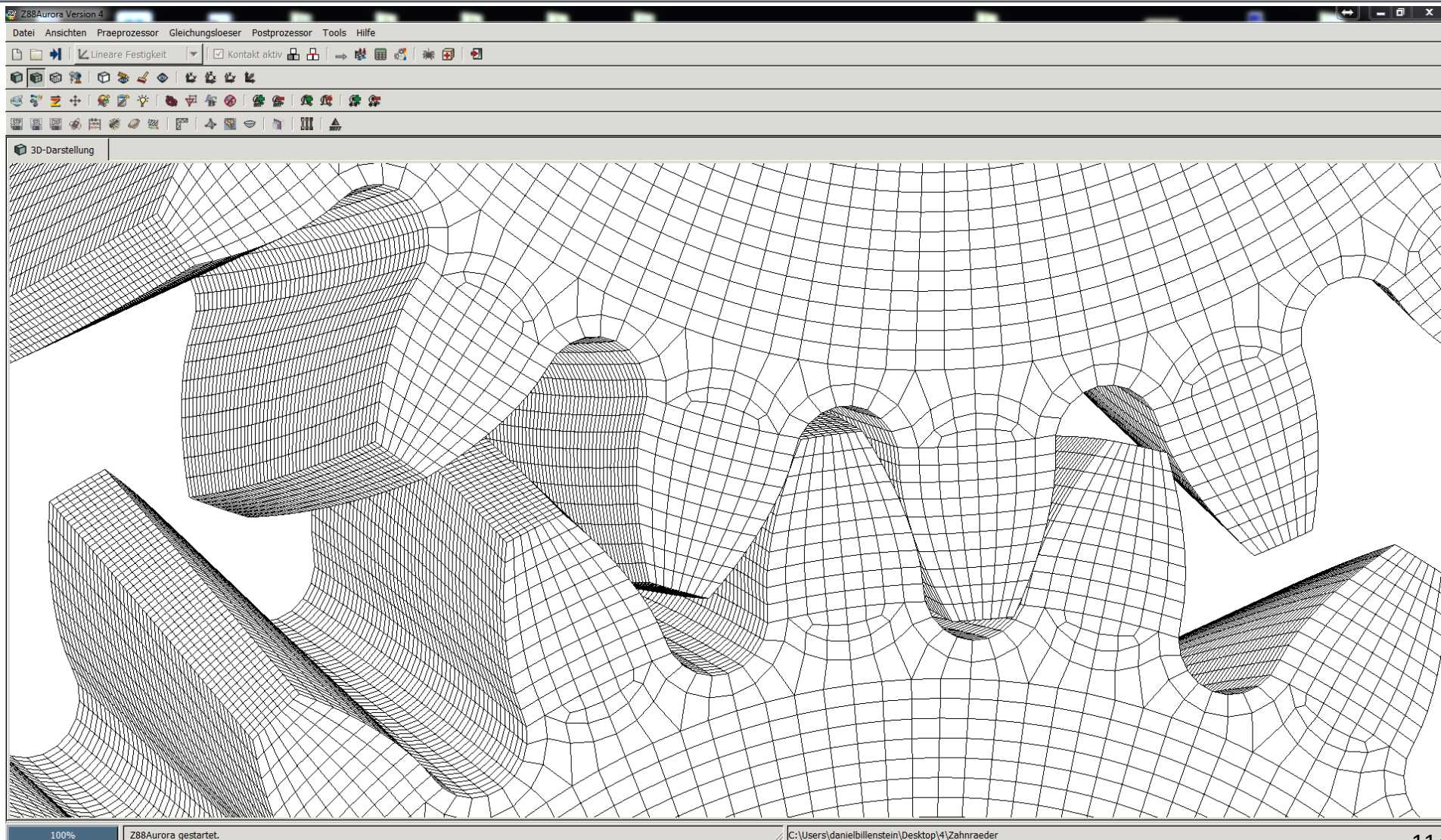
2 Kontaktdiskretisierungen: K-F, F-F

3 Mathematische Einbaumethoden



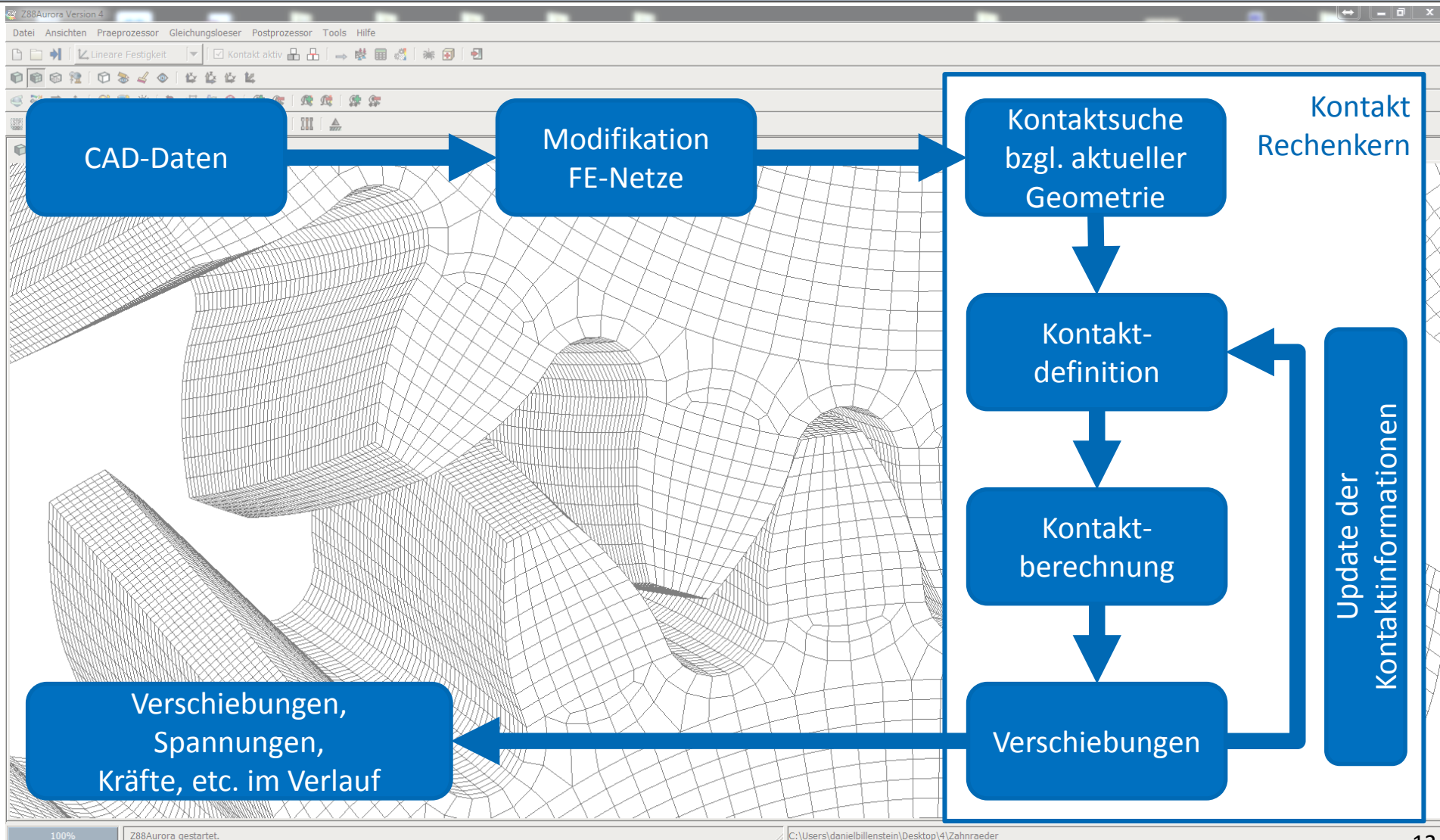
Finite-Elemente-Kontaktanalyse

Ablaufschema



Finite-Elemente-Kontaktanalyse

Ablaufschema



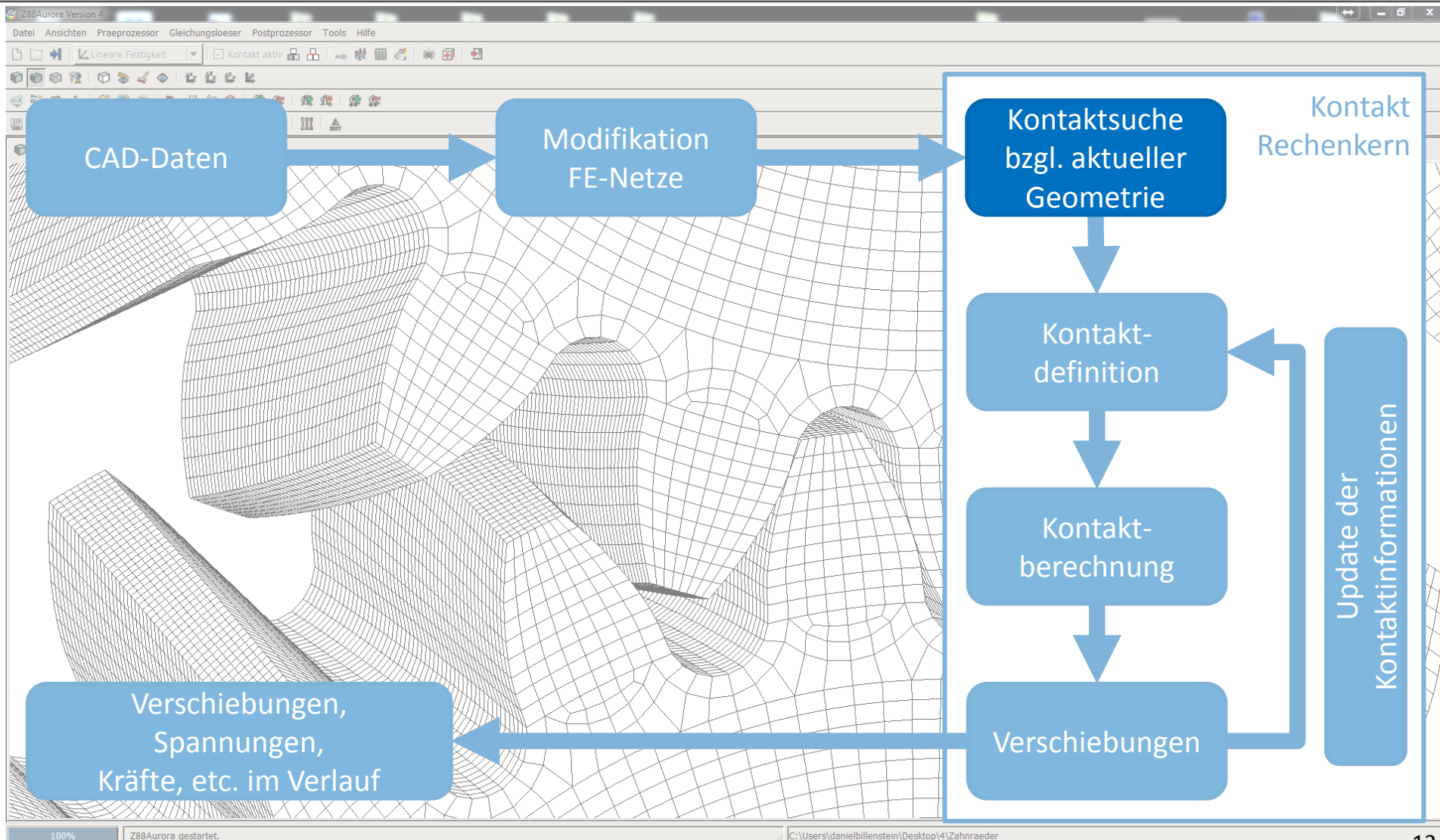
Quelle: [4]

C:\Users\danielbillenstein\Desktop\4\Zahnraeder

12

Finite-Elemente-Kontaktanalyse

Ablaufschema

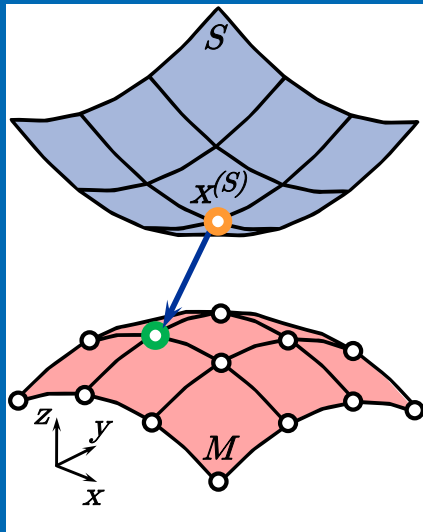


Quelle: [4]



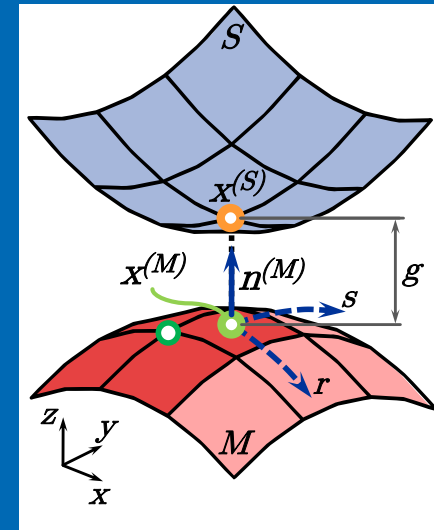
1. Globale Suche

- Messung des Abstandes zweier Punkte zwischen allen Punkten des einen und des anderen Körpers
- Beschleunigung: Beschränkung auf alle Oberflächenknoten oder auf ausgewählte Bereiche



2. Lokale Suche

- Berechnung der Koordinaten des Punktes x_1 , sodass der Abstand $g = x_2 - x_1 \rightarrow \text{Min!}$

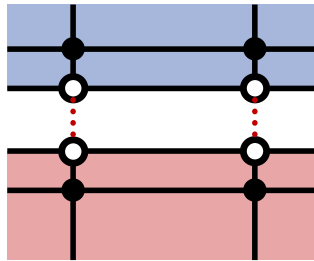


- Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems



Diskretisierungsmöglichkeiten

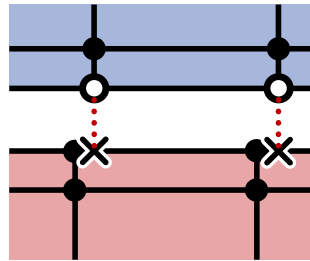
Knoten – Knoten



Knoten eines Körpers stehen in der Beziehung mit den Oberflächenknoten des anderen Körpers

- Sehr selten in der FEA
- In der FEA kaum realisierbar
- Numerisch einfach und schnell zu berechnen

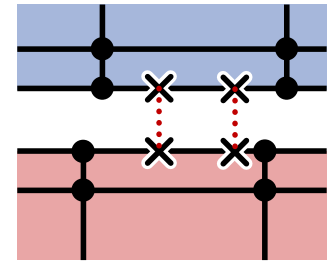
Knoten – Fläche



Oberflächenknoten eines Körpers stehen in der Beziehung mit den Elementoberflächen des anderen Körpers

- Tritt häufig auf
- In der FEA sehr gut realisierbar
- Deutlich größerer Berechnungsaufwand

Fläche – Fläche

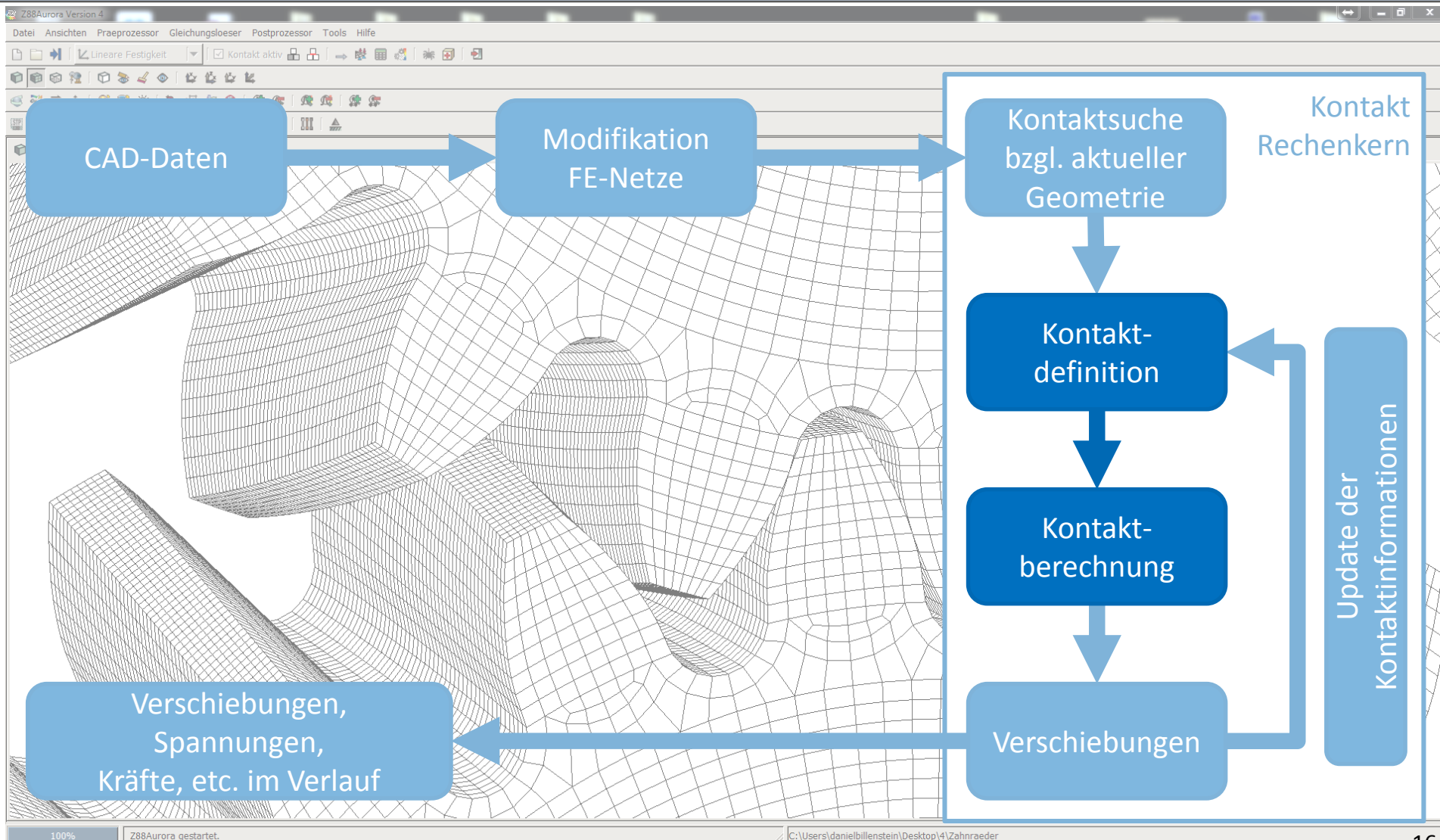


Elementoberflächen eines Körpers stehen in der Beziehung mit den Elementoberflächen des anderen Körpers

- Häufig bei höheren Elementansätzen
- In der FEA sehr gut realisierbar
- Größter Berechnungsaufwand

Finite-Elemente-Kontaktanalyse

Ablaufschema



Quelle: [4]



Mathematische Lösungsansätze zur Einbringung der Zwangs-/Kontaktbedingungen G

Lagrange-Verfahren

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ -\mathbf{g} \end{bmatrix}$$

- + Keine Neukompilation notwendig
- + Exakte Lösung
- + Berechnung der Kontaktkraft λ
- Vergrößerung des Gleichungssystems
- Matrix nicht positiv definit

Gest. Lagrange-Verfahren

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ -\mathbf{g} \end{bmatrix}$$

- + Keine Neukompilation notwendig
- + Berechnung der Kontaktkraft λ
- + Positiv definite Matrix
- Näherungslösung durch Störmatrix \mathbf{H}
- Vergrößerung des Gleichungssystems

Penalty-Verfahren

$$[\mathbf{K} + \mathbf{K}_P][\mathbf{u}] = [\mathbf{f}]$$

- + Positiv definite Matrix
- + Keine Vergrößerung des Gleichungssystems
- Neukompilation notwendig
- Nur Näherung der Undurchdringlichkeitsbedingung
- Großer Penalty-Parameter: Schlechte Matrixkondition



Mathematische Lösungsansätze zur Einbringung der Zwangs-/Kontaktbedingungen G

Lagrange-Verfahren

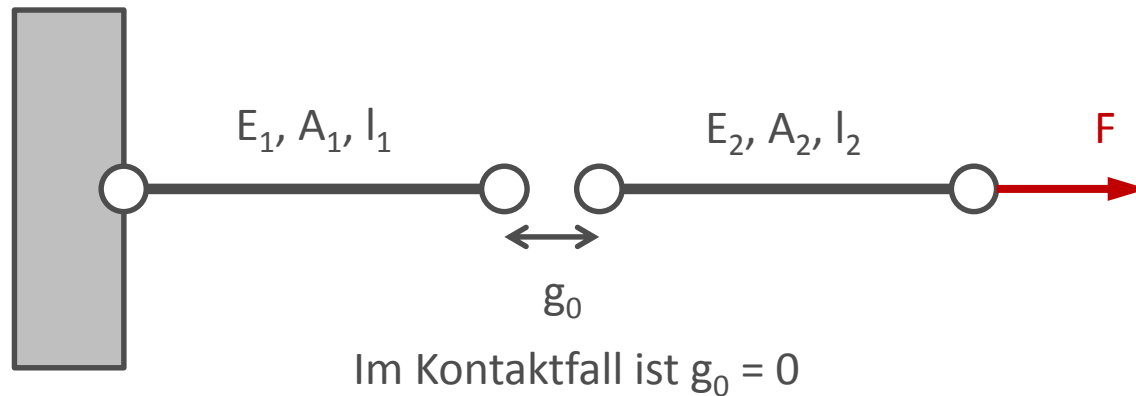
$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Gest. Lagrange-Verfahren

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Penalty-Verfahren

$$[\mathbf{K} + \mathbf{K}_P][\mathbf{u}] = [\mathbf{f}]$$



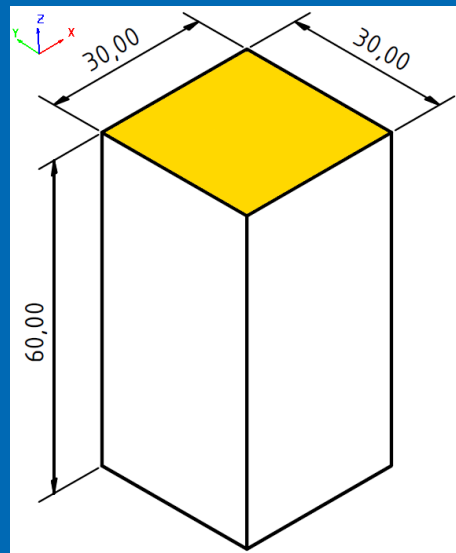
Validierung Z88-Kontaktmodul

Analytisches Beispiel: Druckstab



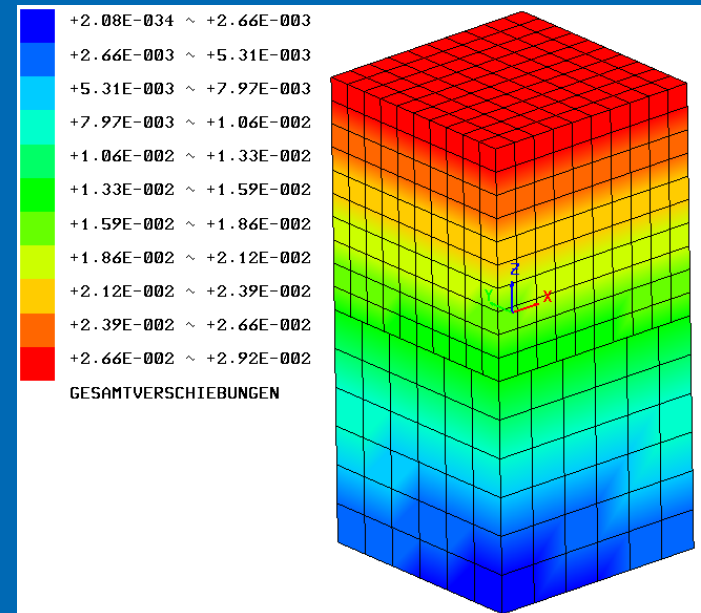
Analytische Berechnung

$$u_{ref} = \frac{F}{K} = \frac{p \cdot A}{E \cdot A/l} = 0.0286mm$$



Finite-Elemente-Kontaktanalyse

$$u_{FEA} = 0.0292mm$$



Validierung Z88-Kontaktmodul

Kontakt Patch-Test nach Bathe

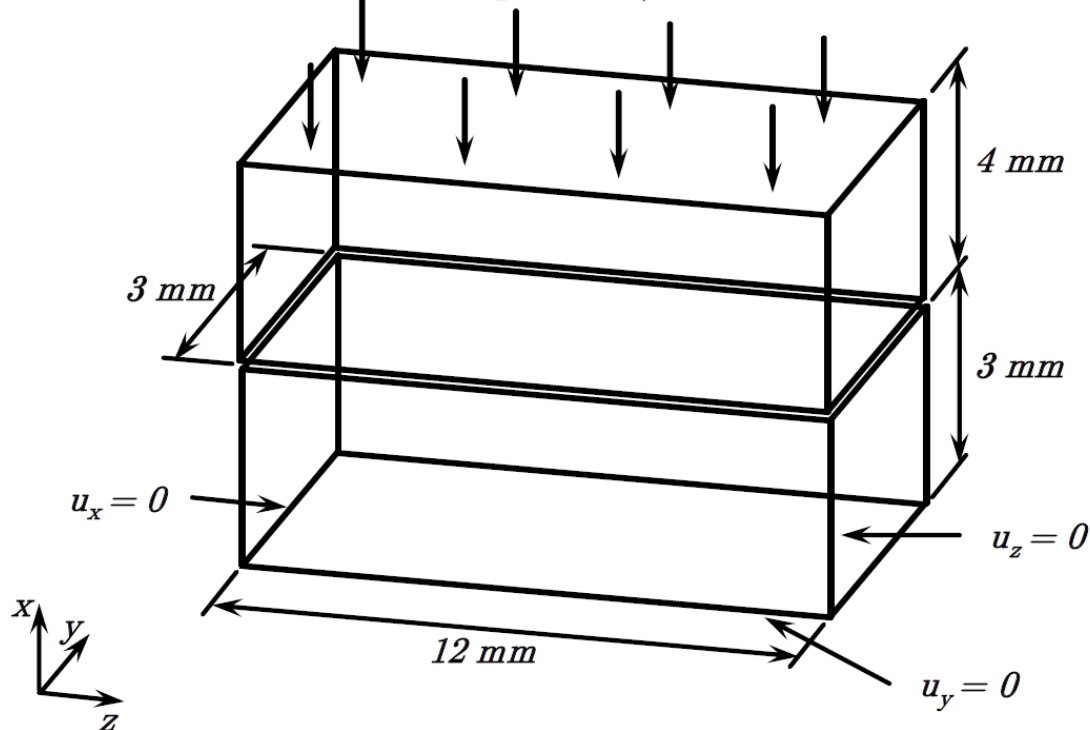


Validierung anhand der Homogenität der Kontaktdruckverteilung

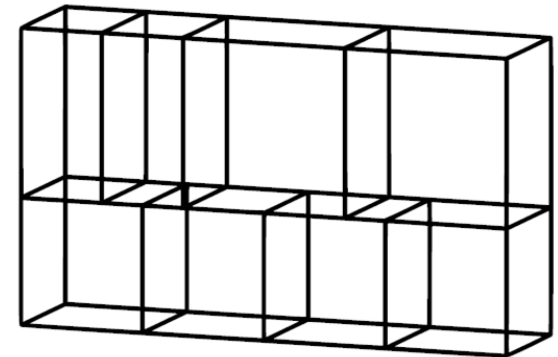
Modellparameter

$$E = 206.000 \text{ N/mm}^2, \nu = 0,3$$

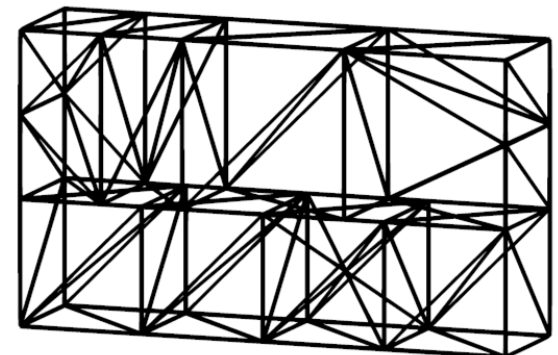
$$p = 10 \text{ N/mm}^2$$



Hexaeder-Modell



Tetraeder-Modell



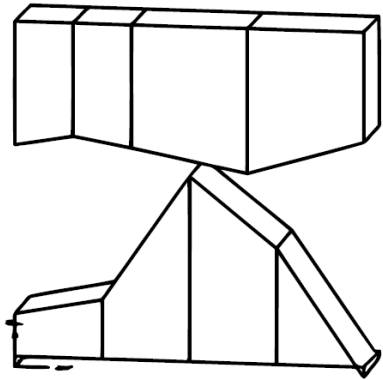
Quelle: [7]

20

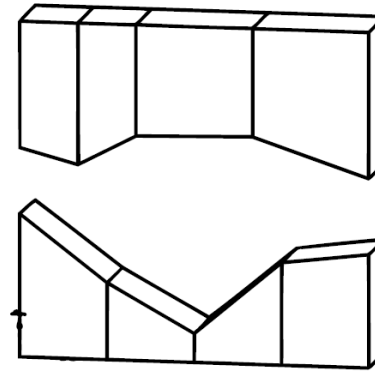


Hexaeder-Modell: Qualitative Spannungsverteilung der Kontaktfläche (Explosionsdarstellung)

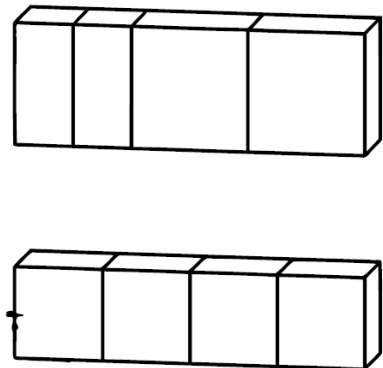
Knoten – Fläche



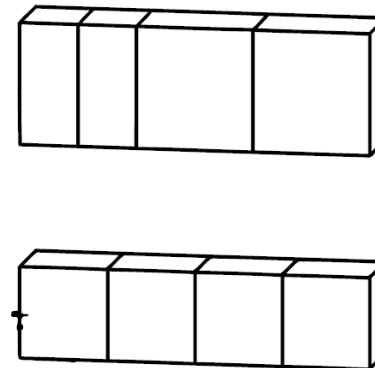
Fläche – Fläche (1 Stützstelle)



Fläche – Fläche (4 Stützstellen)



Fläche – Fläche (16 Stützstellen)



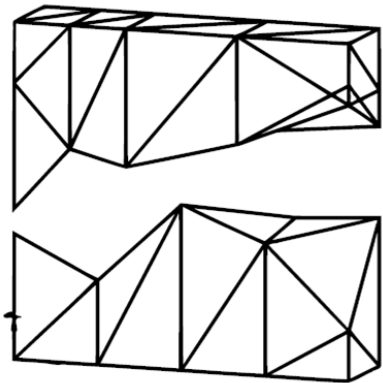
Validierung Z88-Kontaktmodul

Kontakt Patch-Test nach Bathe

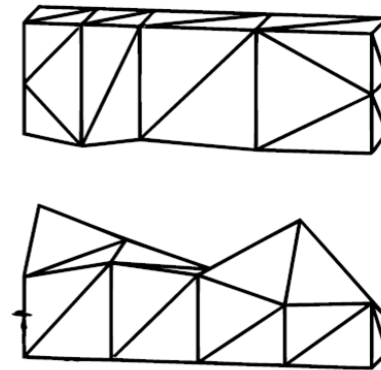


Tetraeder-Modell: Qualitative Spannungsverteilung der Kontaktfläche (Explosionsdarstellung)

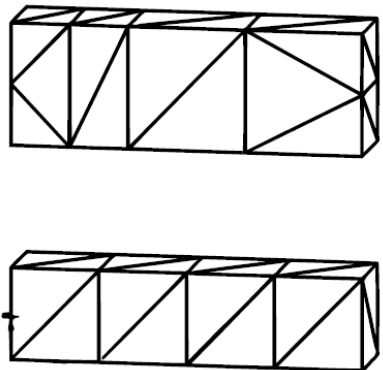
Knoten – Fläche



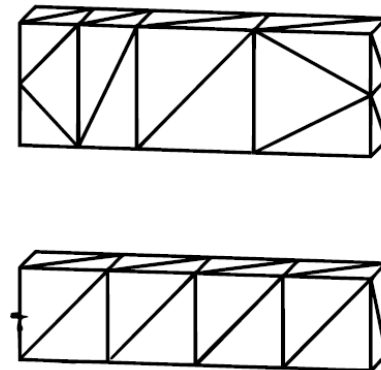
Fläche – Fläche (1 Stützstelle)



Fläche – Fläche (3 Stützstellen)



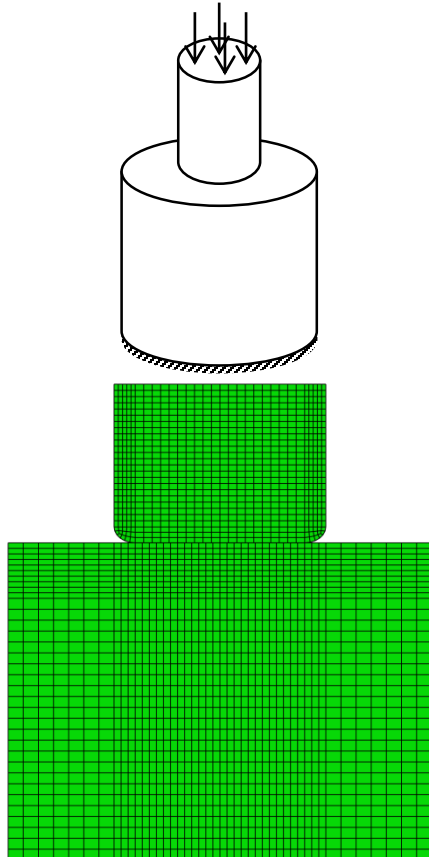
Fläche – Fläche (7 Stützstellen)





Validierung anhand der Referenz-Verschiebungslösungen der NAFEMS

Modell



Modellparameter

- Kontaktart: Reibungsfrei (Trennung verboten)
- Lineare Hexaeder (55760 Elemente)
- Anzahl Freiheitsgrade: 703218
- Druck $p = 100 \text{ N/mm}^2$
- Fixierung des Bodens $u_x = u_y = u_z = 0$
- Simulationseinstellungen nach NAFEMS [8]

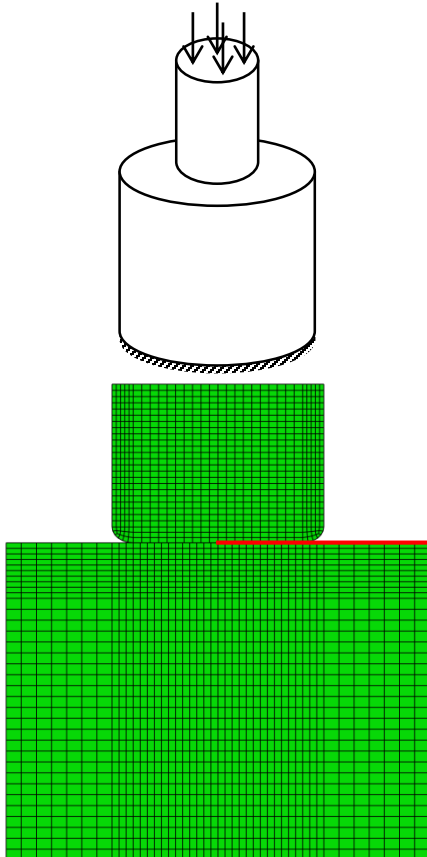
Validierung Z88-Kontaktmodul

NAFEMS Contact Benchmark: 3D Punch

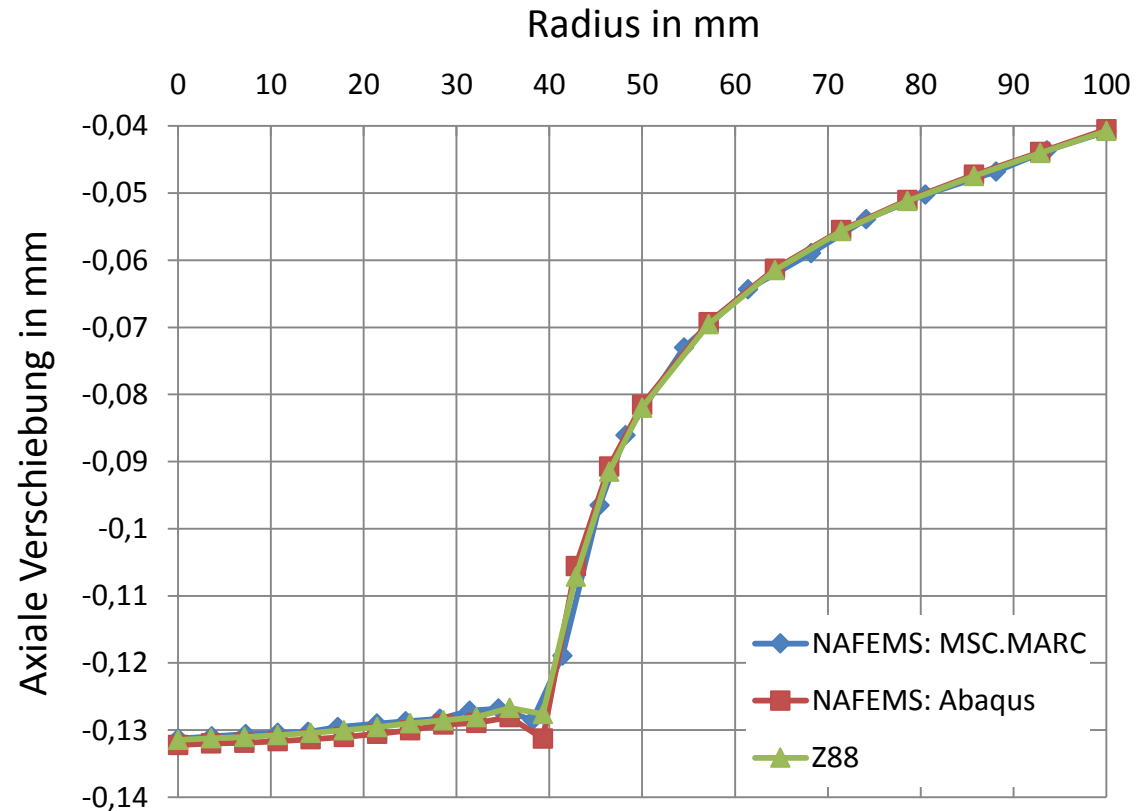


Validierung anhand der Referenz-Verschiebungslösungen der NAFEMS

Modell



Ergebnisse



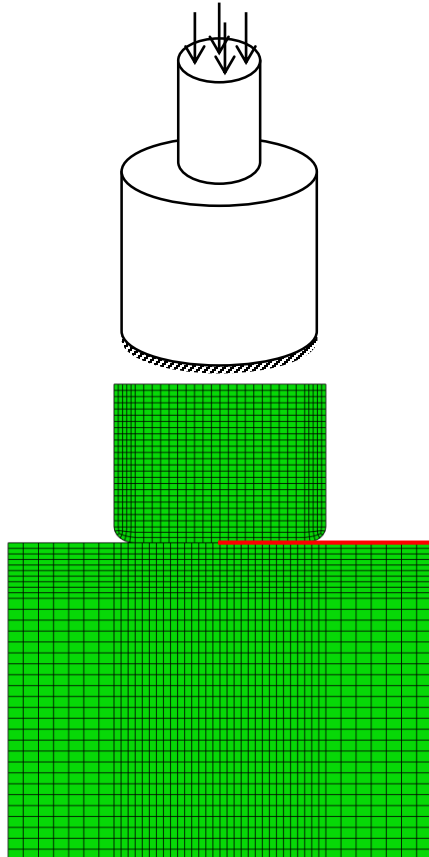
Validierung Z88-Kontaktmodul

NAFEMS Contact Benchmark: 3D Punch

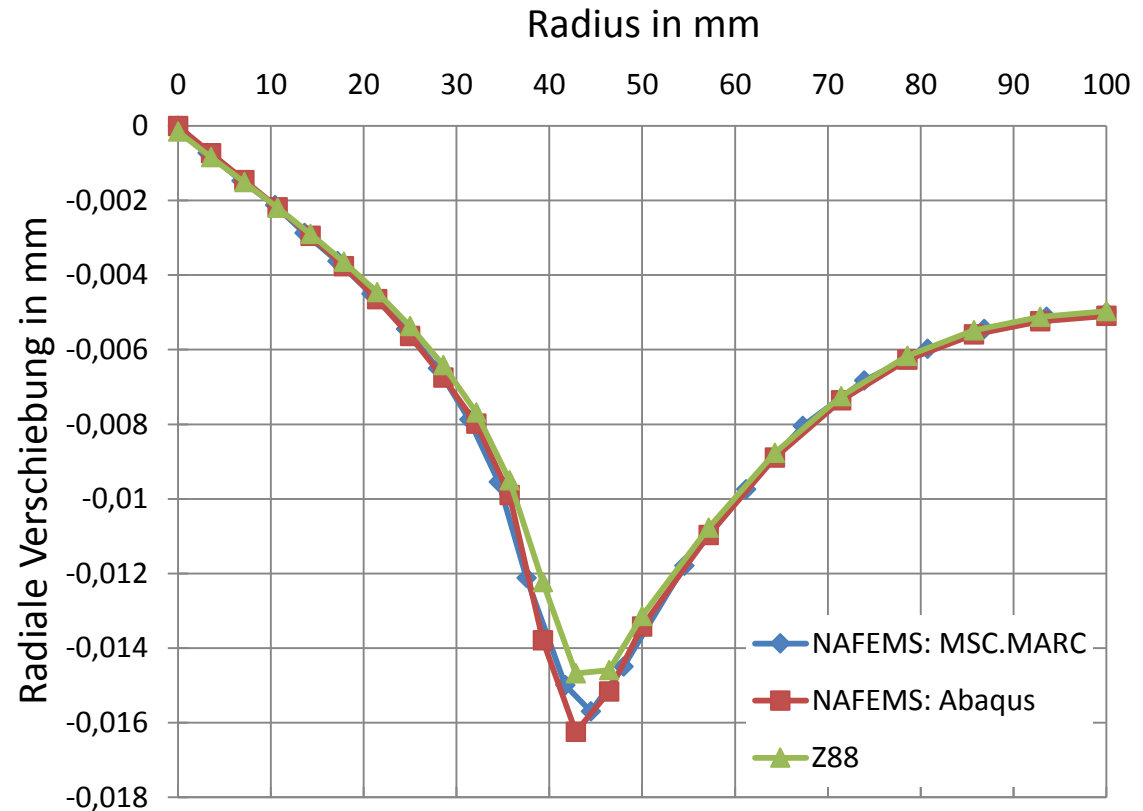


Validierung anhand der Referenz-Verschiebungslösungen der NAFEMS

Modell



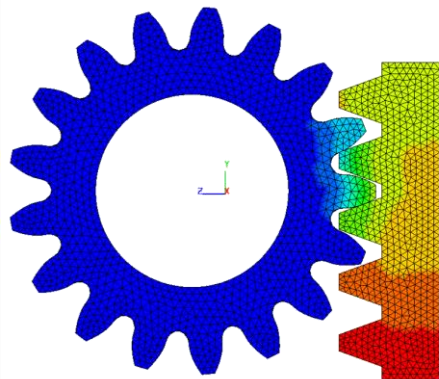
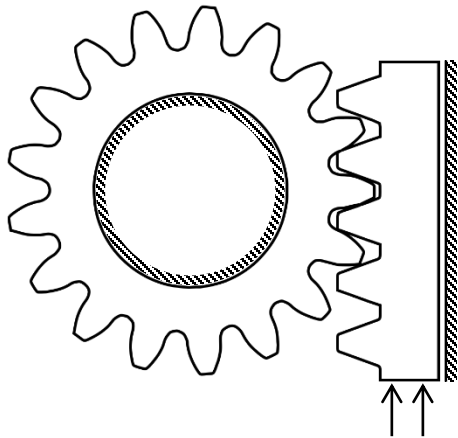
Ergebnisse





Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Modellparameter

- Kontaktart: Reibungsfrei (Trennung erlaubt)
- Lineare Tetraeder (80034 Elemente)
- Anzahl Freiheitsgrade: 376449
- Druck $p = 200 \text{ N/mm}^2$
- Fixierung des Zahnrades und reibungsfreie Lagerung der Zahnstange

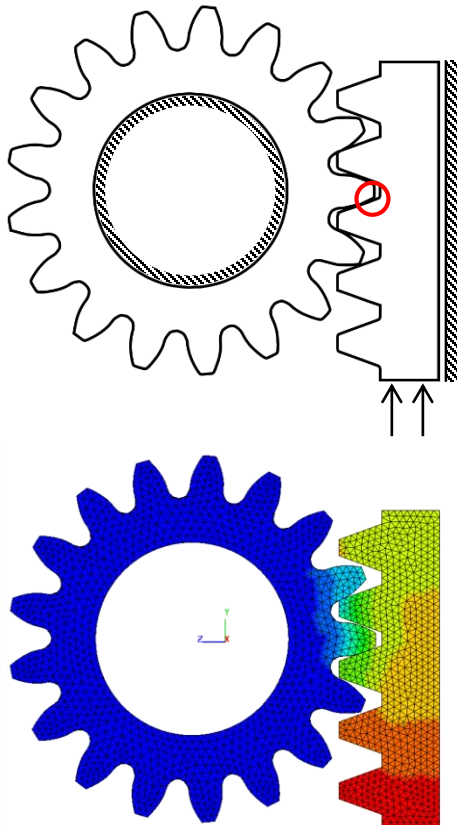
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Zahnstange

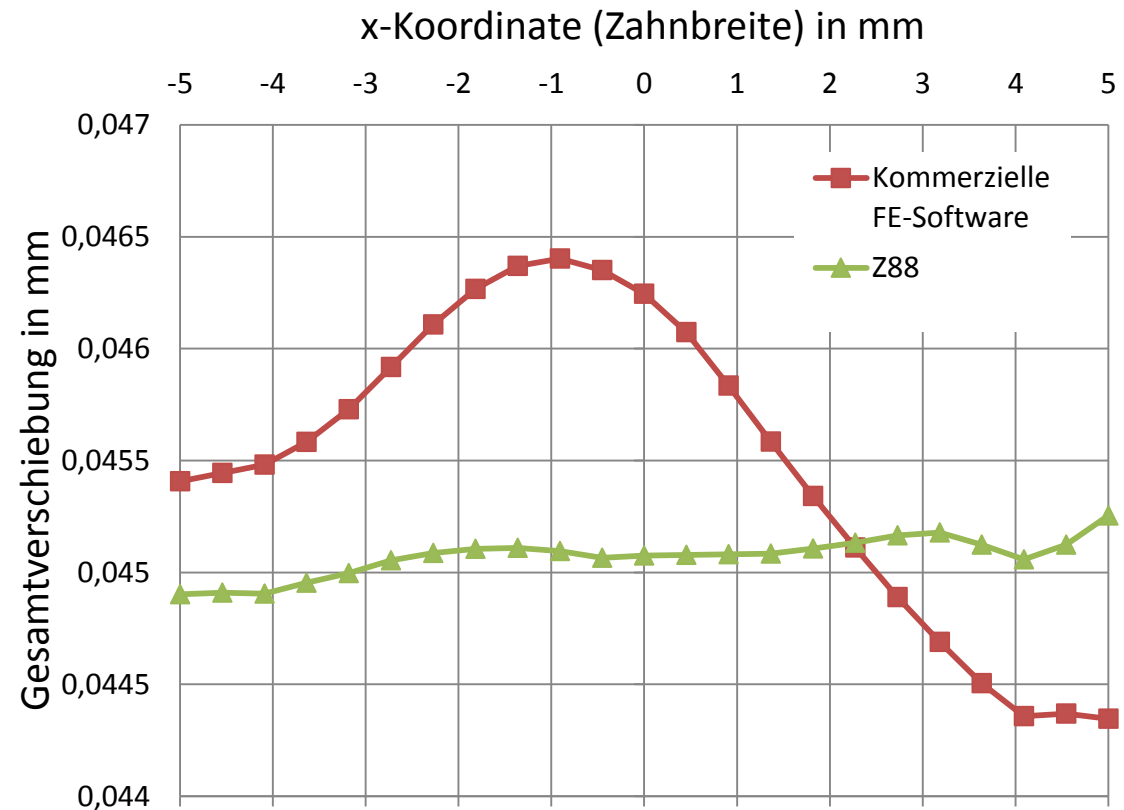


Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Ergebnisse



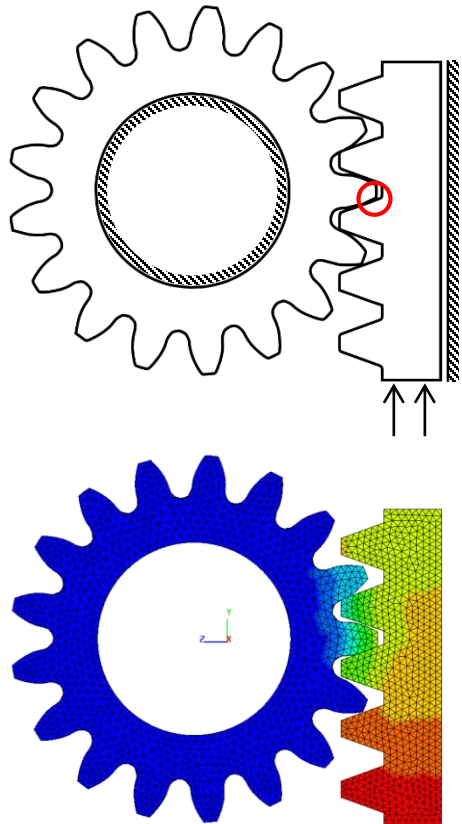
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Zahnstange

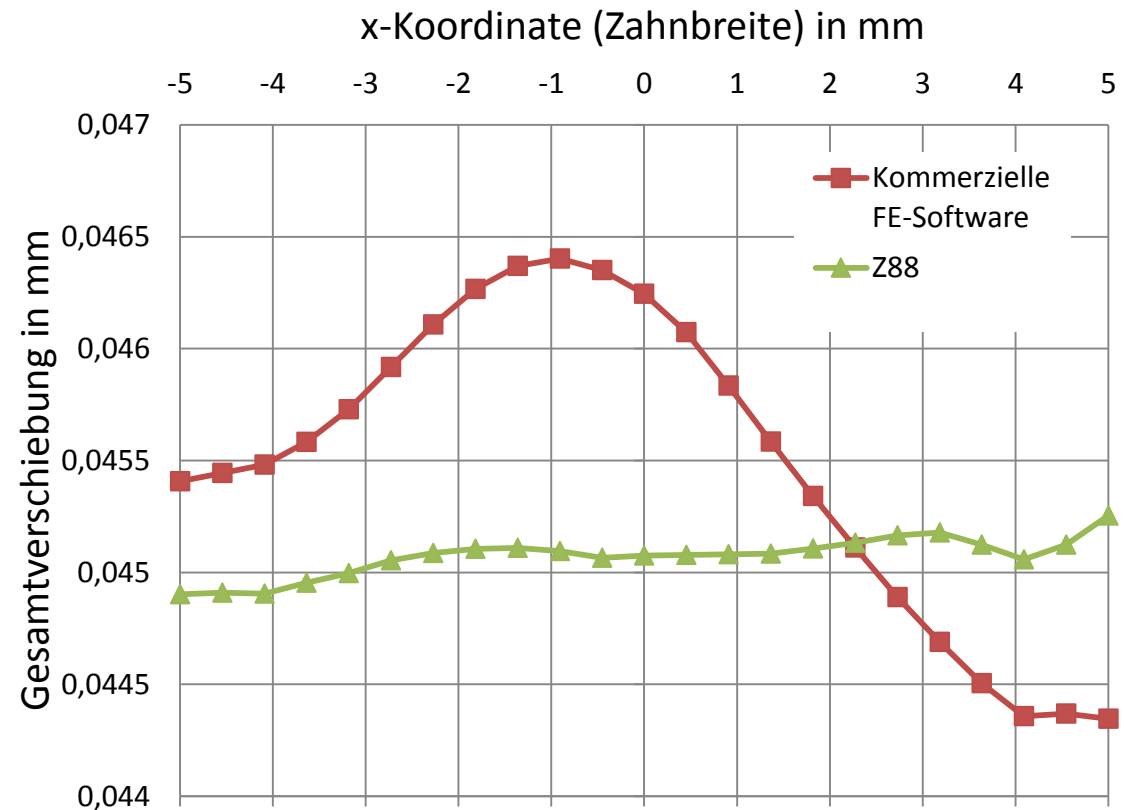


Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Ergebnisse



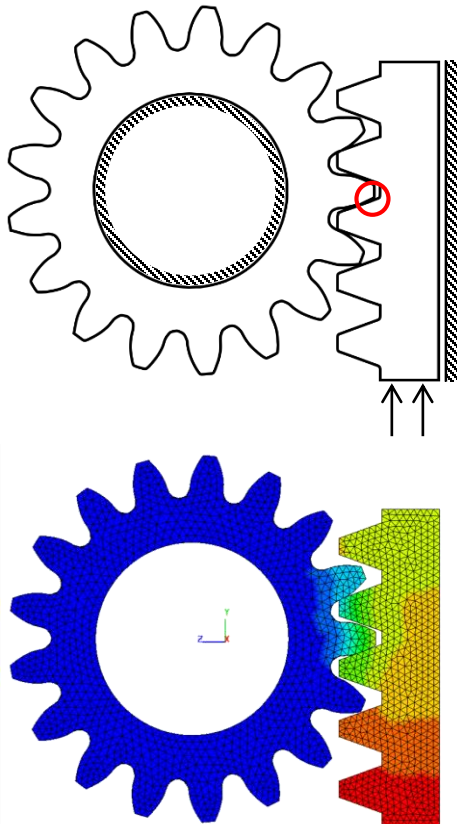
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Zahnstange

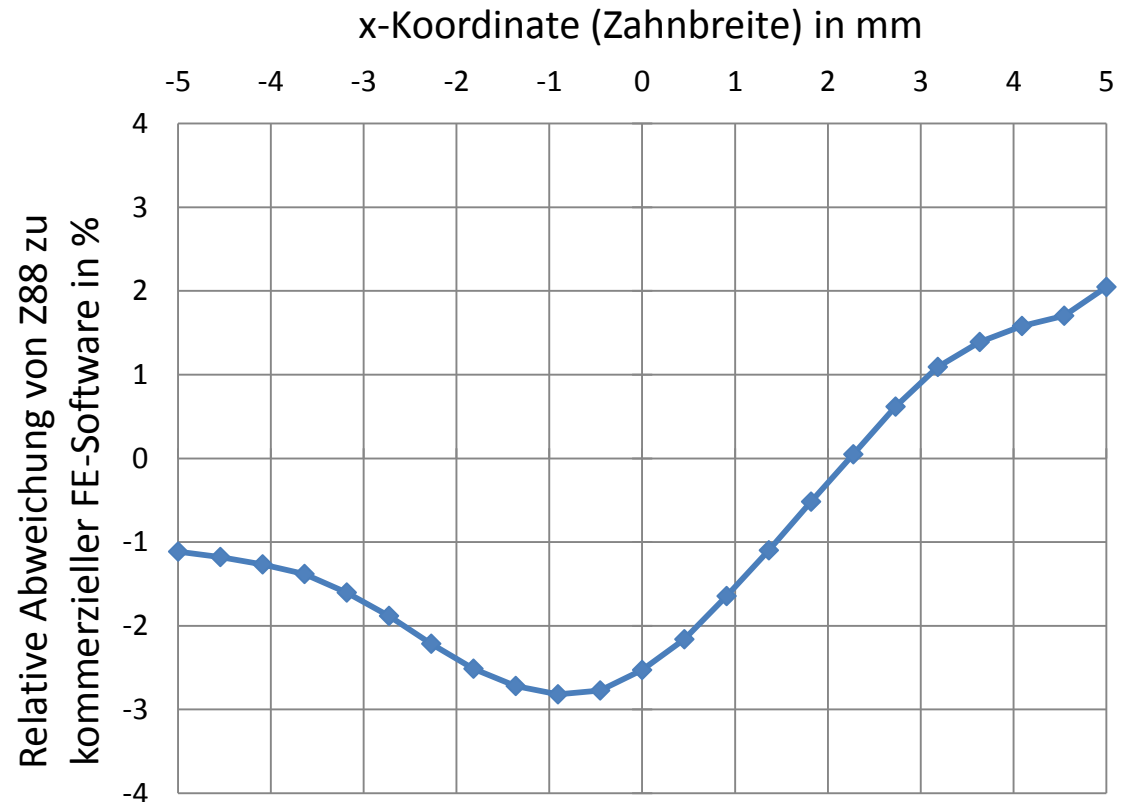


Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Ergebnisse



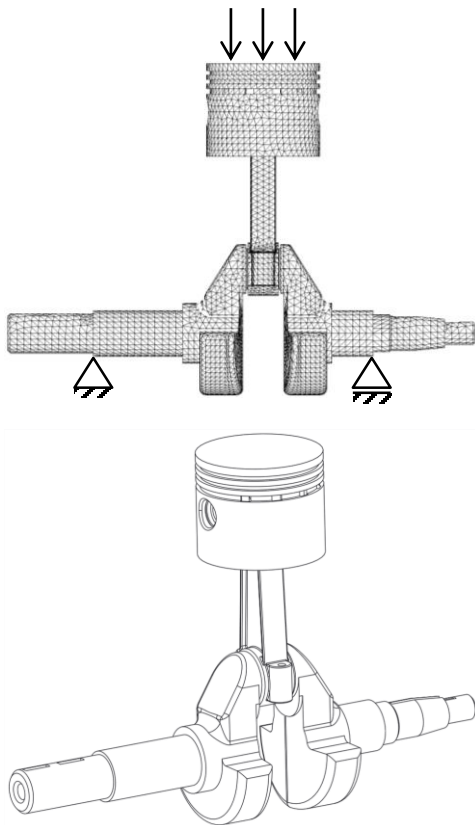
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Kurbeltrieb



Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Modellparameter

- 4 Bauteile: Kolben, Kolbenbolzen, Pleuel, Kurbelwelle
- Kontaktart: Reibungsfrei (Trennung erlaubt)
- Quadratische Tetraeder (76711 Elemente)
- Anzahl Freiheitsgrade: 370251
- Druck $p = 2 \text{ N/mm}^2$

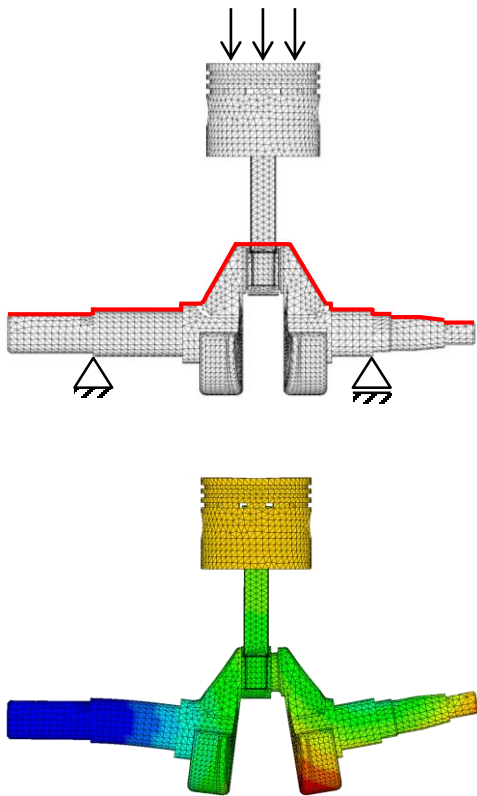
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Kurbeltrieb

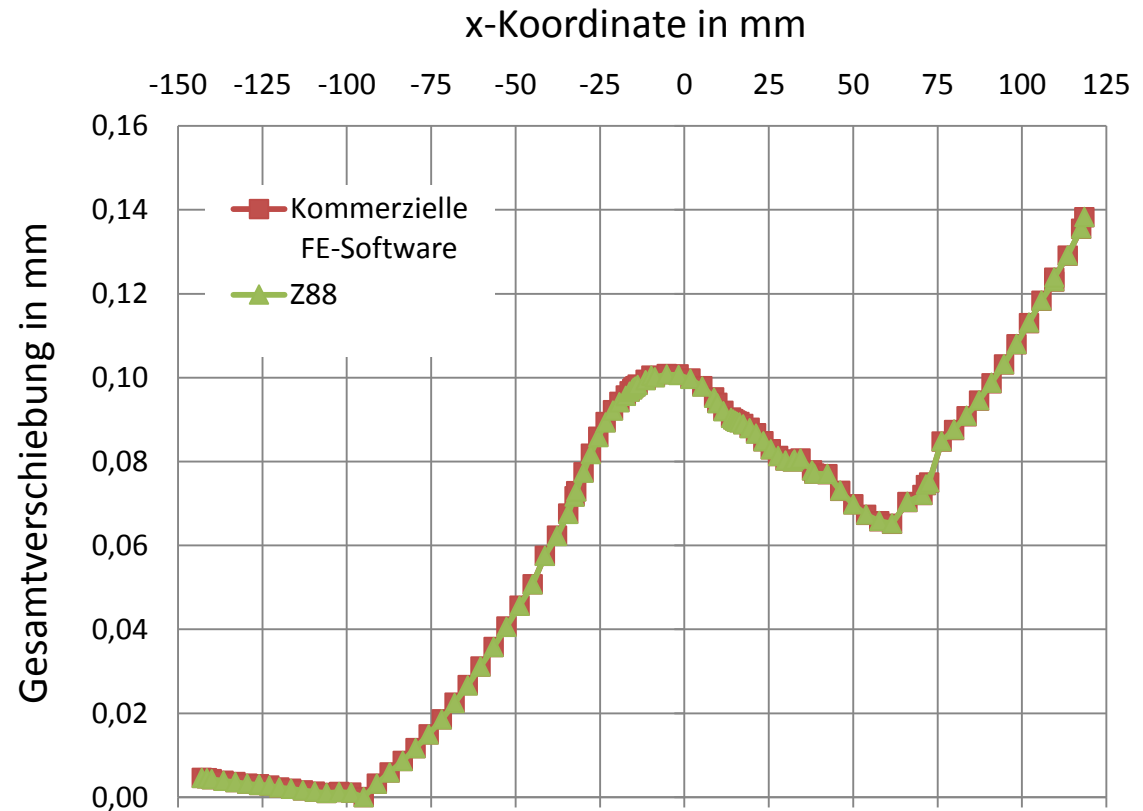


Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Ergebnisse



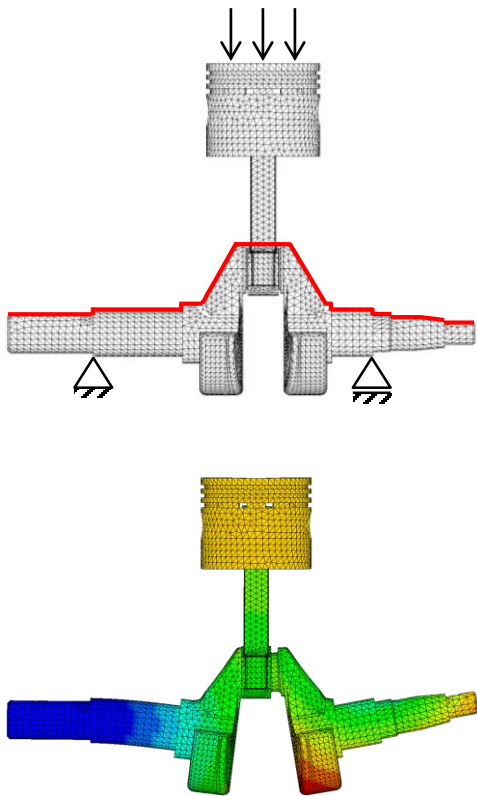
Validierung Z88-Kontaktmodul

Praxisbeispiel: Kurbeltrieb

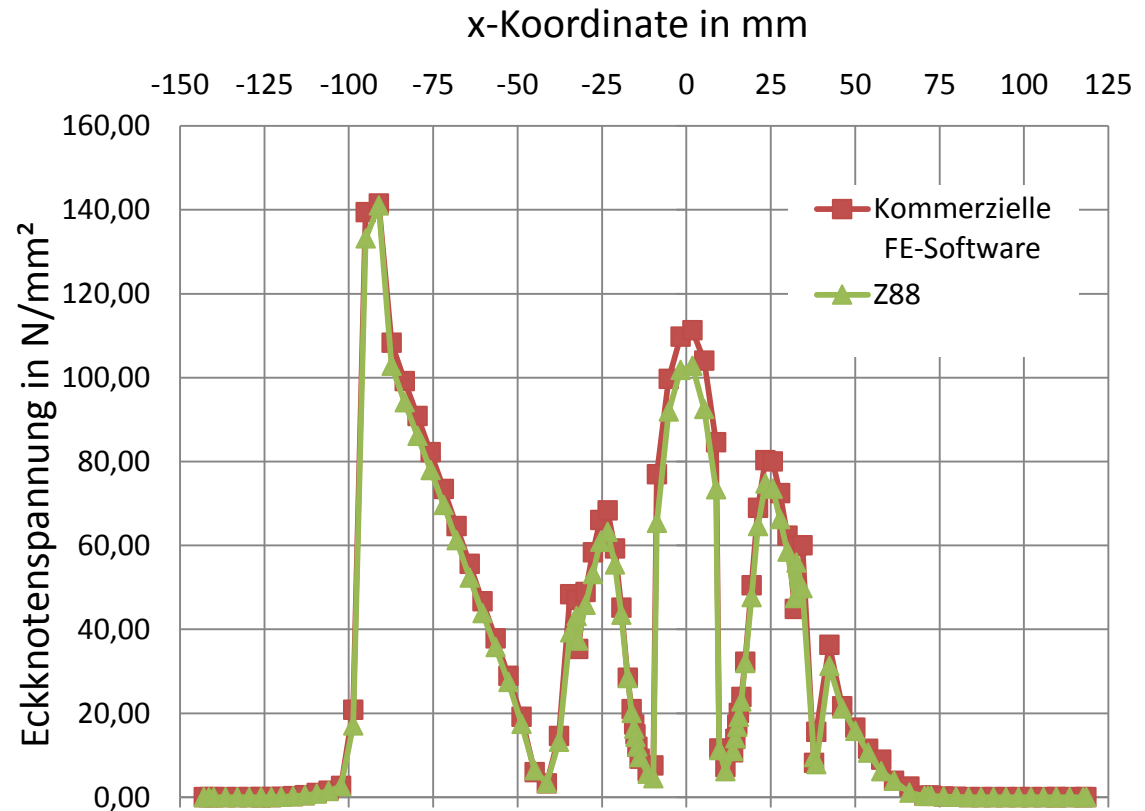


Validierung anhand kommerzieller FE-Software

Modell



Ergebnisse





Zusammenfassung

- Erfolgreiche Validierung des Z88-Kontaktmoduls anhand folgender Kriterien:
 - Analytisches Ergebnis eines Druckstabes
 - NAFEMS Contact Benchmark
 - Kontakt Patch-Test nach Bathe
 - Ergebnisse kommerzieller Software für Praxisbeispiele (Kurbeltrieb, Verzahnung)
- Nachweis der Tauglichkeit für den produktiven Einsatz in der Industrie

Weiterentwicklung

- Implementierung des Kontaktmoduls in die Topologieoptimierung (Z88Arion®)
- Untersuchung einer Systematik für die optimalen Einstellparameter

Release

- Veröffentlichung der Freeware Z88Aurora®V4 mit dem Kontaktmodul zur Hannover Messe 2017
- Download unter: www.z88.de



- [1] Rieg, F.: Z88 Homepage. Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth: „<http://www.z88.de>“. Stand 15.02.2017.
- [2] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. 5. Auflage. Carl Hanser Verlag. München: 2014.
- [3] Goller, D.; Glenk, C.; Rieg, F.: Entwicklung und Implementierung einer Finite-Elemente-Software für mobile Endgeräte. SAXSIM – 7. Saxon Simulation Meeting. Universitätsverlag Chemnitz. Chemnitz: 2015.
- [4] Nützel, F.: Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Systems auf Basis von Z88 zur Berechnung von Kontaktaufgaben aus der Antriebstechnik. Dissertation. Universität Bayreuth: 2015.
- [5] Wriggers, P.: Computational Contact Mechanics. 2. Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York: 2006.
- [6] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. 2. Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York: 2001.
- [7] Bathe, K.-J.; Nagi, E.-A.: Stability and patch test performance of contact discretizations and new solution algorithm. Computer & Structures, S. 1473-1486, Band 79, 2001.
- [8] Konter, A.W.A.: Advanced Finite Element Contact Benchmarks. NAFEMS Report R0094, 2006.

